

# ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Л.В. Одиногорец, И.Е. Проценко, А.Н. Черноус  
Сумский государственный университет  
244007, г. Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2

В последнее время большое внимание уделяется исследованию электрофизических свойств как периодических, так и общего вида пленочных структур. Однако, если вопрос о термическом коэффициенте сопротивления (ТКС) изучен достаточно полно как в теоретическом [1, 2], так и экспериментальном отношении [3], то аналогичные исследования тензочувствительности проведены лишь на одно- и двухслойных пленках металлов [4, 5].

В работе [4] была предложена микроскопическая теория размерного эффекта в тензочувствительности двухслойных монокристаллических пленок. Используя подход авторов [4] в работе [5] были получены соотношения для коэффициентов

продольной ( $\gamma$ ) и поперечной тензочувствительности ( $\gamma_i$ ) двухслойных поликристаллических пленок. В зависимости от конкретной пленочной пары расчетные данные, полученные по указанным соотношениям могут отличаться от экспериментальных результатов от 1.2 (Cr/Ni) до 4 (Ni/Co) раз, что объясняется [6] тем обстоятельством, что теоретические соотношения [5] не учитывают процессов взаимной диффузии. Если увеличить число слоев даже до  $n = 3$ , то в рамках микроскопического подхода получаются настолько сложные соотношения для  $\gamma$  и  $\gamma_i$ , что изучать размерные эффекты в тензочувствительности становится практически невозможным.

В связи с этим в настоящей работе проанализирован тензоэффект в макроскопическом приближении.

Исходя из общепринятого предположения о независимости электрических токов в отдельных слоях, в случае трехслойной пленки можно записать выражение для удельного сопротивления:

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2 \rho_3 (d_1 + d_2 + d_3)}{\rho_2 \rho_3 d_1 + \rho_1 \rho_3 d_2 + \rho_1 \rho_2 d_3}, \quad (1)$$

где  $d_i$  - толщина  $i$ -го слоя.

Взяв производную по деформации  $d \epsilon_i = d \ln l$  (или  $d \epsilon_i = = d \ln a$ ) от  $\ln \rho$ , получаем:

$$\begin{aligned} \gamma_i \cong \frac{d \ln \rho}{d \ln l} = \gamma_{i1} + \gamma_{i2} + \gamma_{i3} - \frac{\rho_2 \rho_3 d_1 (\gamma_{i2} + \gamma_{i3} - \mu_{j1}) + \rho_1 \rho_3 d_2 (\gamma_{i1} + \gamma_{i3} - \mu_{j2})}{\rho_2 \rho_3 d_1 + \rho_1 \rho_3 d_2 + \rho_1 \rho_2 d_3} + \\ \frac{\rho_2 \rho_3 d_3 (\gamma_{i2} + \gamma_{i3} - \mu_{j1})}{\rho_2 \rho_3 d_1 + \rho_1 \rho_3 d_2 + \rho_1 \rho_2 d_3} - \mu_{j1} - \mu_{j2} - \mu_{j3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $l$  и  $a$  - начальная длина и ширина трехслойной пленки,  $\mu_i$  - коэффициент Пуассона  $i$ -го слоя.

Соотношение (2) можно обобщить на случай произвольного числа слоев:

$$\gamma_i \cong \sum_{k=1}^n \gamma_{ik} - \frac{\sum_{k,m=1}^n d_k (\gamma_{im} + \gamma_{ik} - \mu_{jk}) \rho_k \rho_m \dots}{1/2 \sum_{k,m=1}^n d_k \rho_k \rho_m \dots} - \sum_{k=1}^n \mu_{jk}, \quad (3)$$

где  $i \neq k \neq m \neq \dots$ . Отметим, что соотношение для  $\gamma_i$  имеет аналогичный вид.

Для экспериментальной проверки соотношения (3) была подготовлена серия двух- и трехслойных образцов на основе хрома, кобальта и никеля по методике, описанной в [6]. Данные, представленные в таблице, позволяют судить о степени соответствия экспериментальных и расчетных величин коэффициента продольной тензочувствительности. Соотношение (3) было также использовано для расчета

трехмерной диаграммы в координатах " коэффициент тензочувствительности - толщина" для пленочных систем Co/Cr/Co/П и Cr/Co/Ni/П (рисунок). При построении диаграмм учитывалось, что для двухслойной пленки имеют место

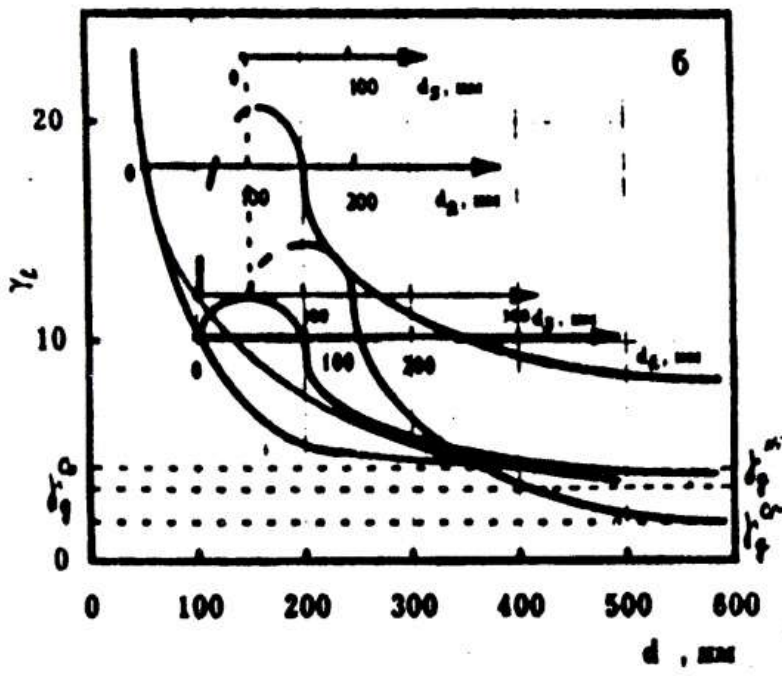
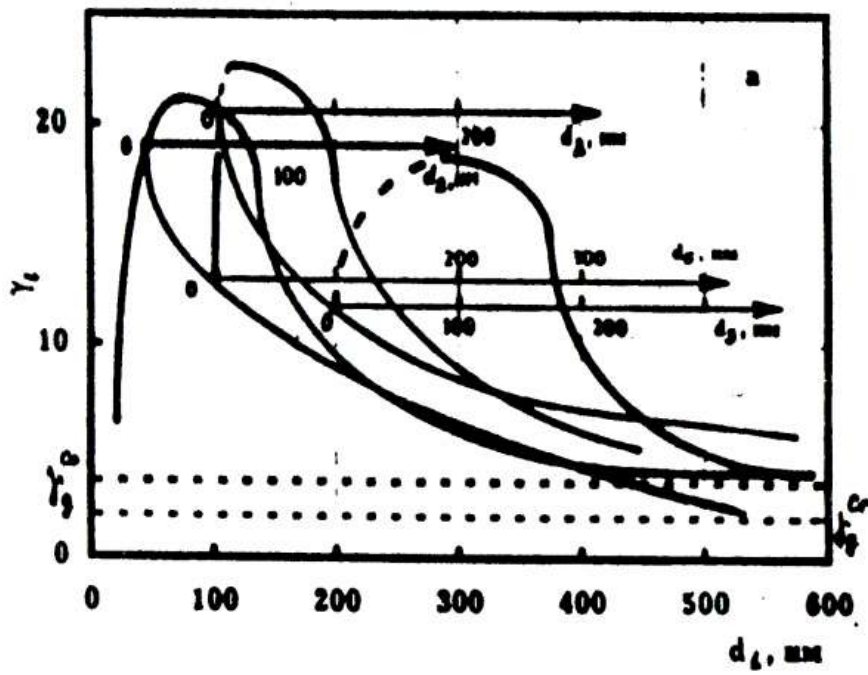


Рис. Расчетные диаграммы "  $\gamma - d$  " для трехслойных пленок Co/Cr/Co/П (а) и Cr/Co/Ni/П (б).

такие соотношения:

$$\lim_{d_1 \rightarrow \infty} \gamma_i = \lim_{d_1 \rightarrow \infty} \gamma_{i1} + \gamma_{i2} - \lim_{d_1 \rightarrow \infty} \gamma_{i1} = \gamma_{i2},$$

$$\lim_{d_1 \rightarrow 0} \gamma_i = \gamma_{i1},$$
(4)

где  $\gamma_{i1}$  - асимптотическое значение  $\gamma_{i1}$  при  $d_1 \rightarrow \infty$ .

Соответственно, для трехслойной пленки имеем:

$$\lim_{d_i \rightarrow \infty} \gamma_i = \gamma_{i1}$$

$$\lim_{d_i \rightarrow 0} \gamma_i = \gamma_{i2} + \gamma_{i1} - \frac{d_1 \rho_2 \gamma_{i2} + d_2 \rho_1 \gamma_{i1}}{d_1 \rho_2 + d_2 \rho_1} \gamma_i^{(i-2)}, \quad (5)$$

где через  $\gamma_i^{(i-2)}$  обозначена величина  $\gamma_i$  для двухслойной пленки.

Таблица. Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициента продольной тензочувствительности.

Пленка (толщина, нм)	$\gamma_i$	
	экспериментальное	расчетное
Cr(30)/Co(90)/П*)	13.0	18.3
Co(60)/Cr(60)/П	25.8	22.0
Co(20)/Ni(50)/П	20.3	18.6
Ni(60)/Co(30)/П	14.4	15.6
Cr(20)/Co(20)/Ni(20)/П	22.7	24.3
Ni(75)/Co(75)/Cr(65)/П	24.4	13.8
Co(50)/Cr(50)/Co(55)/П	19.8	21.2
Cr(60)/Co(30)/Cr(40)/П	21.6	22.1

\*) П - подложка.

Отметим, что некоторое отличие диаграмм для пленок Co/Cr/Co/П и Cr/Co/Ni/П связано с различной размерной зависимостью  $\gamma_i = \gamma_i(d_i)$ , для пленок Co и Ni, соответственно. Укажем также, что ранее нами [7] были рассчитаны аналогичные диаграммы в координатах "термический коэффициент сопротивления - толщина". Отличительной особенностью размерного эффекта в этом случае является следующее. При увеличении толщины второго слоя величина термического коэффициента сопротивления ( $\beta$ ) возрастает, если  $\beta_{g1} < \beta_{g2}$  или  $\beta_1 < \beta_{g2}$  или уменьшается (если  $\beta_1 > \beta_{g2}$ ), выходя на асимптотическое значение  $\beta_{g2}$ , в то время как в однослойных пленках возрастает с ростом толщины. При увеличении числа слоев фиксировалась осциллирующая зависимость  $\beta$  от толщины последующих слоев. Аналогичная осциллирующая зависимость имеет место в случае тензочувствительности.

#### ЛИТЕРАТУРА

I. Zalar A., Panjan P., Hofmann S. AES depth profiling of a new type of multilayers.// Thin Solid Films. - 1989. - V. 181. - P. 277 - 289.

2. Chu-Xing Chen. Electrical Conductivity of Multi-Layered Metallic Thin Films // Appl. Phys. - 1986. - V. A40, № 1. - P. 37 - 40.

3. Protsenko I., Odnodvoretz L., Petrenko S., Chornous A. Size Effect and Processes of Interdiffusion in Multilayer Films // Cryst. Res. Technol. - 1995. - V.30, № 8. - P.1079 - 1083.

4. Khater F, El-Hiti M. Strain Coefficients of Electrical Resistance of Double - Layer Thin Metallic Films // Phys. Stat. Sol.(a). - 1988. - V.109, N 2. - P. 517 - 523.

5. Кузьменко А.И., Петренко С.В., Проценко И.Е. Эффект тензочувствительности в двухслойных пленках переходных металлов // ВАНТ. Серия: Ядерно - физические исследования. - 1990. - вып. 2. - С. 87 - 89.

6. Проценко И.Е., Чорноус А.Н. Тензочувствительность одно- и двухслойных пленок на основе хрома, никеля и кобальта // Металлофизика и новейшие технологии. - 1994. - т.16, №12. - С. 18 - 83.

7. Проценко І.Ю., Чорноус А.М. Розмірний ефект в електропровідності двохшарових полікристалічних шлівок в умовах взаємної дифузії металів // Вісник Сумського університету. - 1994. - т.16, № 12. - С. 18 - 23.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ В АТОМНО-СИЛОВОМ МИКРОСКОПЕ.

А.В. Покропивный, В.В. Покропивный\*, В.В. Скороход\*  
Московский физико-технический институт  
141700, Долгопрудный, Россия, МФТИ-8  
\* Институт проблем материаловедения НАН Украины,  
252142, Киев, Украина, Кржижановского 3

За 10 лет со дня появления атомно-силовой микроскопии (АСМ) стал мощным инструментом высокого разрешения для исследования структуры поверхности [1], контактных явлений в процессах адгезии, разрушения, наноиндентирования [2] и трения [3], модификации поверхности в нанолитографии [4]. Как и в других видах микроскопии возникла проблема адекватной идентификации АСМ-изображений с реальной структурой. Форма иглы влияет на силу адгезии и АСМ-изображение [1], но детали этой зависимости не изучены. Очевидно, что когда радиус острия  $R$  превышает поперечный размер поверхностного дефекта  $\Delta L$ , часть информации теряется а изображение дефекта искажается. Эта проблема затрагивалась недавно в работе [5], где для вычисления предельно-разрешимой глубины поверхностной канавки использовалась простая геометрическая модель  $h=R-\{R^2-(L/2)^2\}^{1/2}$ , что отражает недостаточный уровень понимания и актуальность этой проблемы.